

## Nota Técnica

# Tomografia elétrica 2D e gravimetria para detecção de sítio contaminado por derivados de petróleo em área de passivo ambiental

*2D electrical tomography and gravimetry for the detection of a site contaminated by oil derivatives in an area of environmental liability*

Valter Antonio Becegato<sup>1</sup>, Francisco José Fonseca Ferreira<sup>2</sup>, Rodoilton Stevanato<sup>3</sup>, Luís Gustavo de Castro<sup>4</sup>, Jefferson Ulisses da Cunha<sup>5</sup>, Vitor Rodolfo Becegato<sup>6</sup>

## RESUMO

Foram realizados ensaios geofísicos, como caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo) com AB=MN=4 m, totalizando 1.024 m de perfis, e levantamento gravimétrico, totalizando 273 estações separadas de 4 em 4 m. Os valores máximos, mínimo, médio e desvio padrão da resistividade elétrica real em ohm.m foram, respectivamente: 35, 2.276, 432 e 344. Com relação às anomalias gravimétricas Bouguer, observou-se que a porção oriental é caracterizada por sinais com maiores amplitudes, em contraposição ao segmento ocidental, onde as mesmas são intermediárias a baixas, destacando-se valores mínimos entre as estações 0-44 m das linhas L4, L5 e L6. Detectou-se a presença de hidrocarboneto a 3 m de profundidade, nas linhas L8 e L9. Análises laboratoriais das amostras de solos e água apontaram valores PHAs que excedem os parâmetros estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/2005.

**Palavras-chave:** passivo ambiental; petróleo; tomografia elétrica; gravimetria.

## ABSTRACT

The following geophysical essays were performed: DC resistivity survey (dipole-dipole array) with AB=MN=4 m, totaling 1.024 m of profiles, and a magnetometric survey, totaling 273 stations split every 4 m. The maximum, minimum, and average values, and the standard deviation of the actual resistivity in ohm.m were respectively: 35, 2.276, 432, and 344. Regarding the Bouguer gravity anomalies, it was observed that the eastern portion is characterized by signals with larger amplitudes, in contrast to the western segment, where these are intermediate to low, especially minimum values between stations 0-44 meters, from lines L4, L5 and L6. The presence of hydrocarbons was detected at a depth of 3 m in lines L8 and L9. Laboratory analysis of soil and water samples showed values of PHAs that exceed the parameters established by the CONAMA resolution nº 357/2005.

**Keywords:** environmental liability; petroleum; electrical tomography; gravimetry.

## INTRODUÇÃO

Os solos são derivados principalmente dos diferentes tipos de rochas, cuja gênese dos mesmos se deve aos fatores de formação. Isso, consequentemente, leva a um comportamento diferenciado da condução da corrente elétrica em diferentes tipos de solos (YOON & PARK, 2001; BECEGATO & FERREIRA, 2005; SAMOUËLIAN *et al.*, 2005) – como os arenosos e argilosos – bem como à presença de água, substâncias

metálicas, sais e outros solutos presentes nos poros dos solos, o que interfere na resistividade elétrica.

Diversos autores (FRIEDEL *et al.*, 2006; AMATO *et al.*, 2009; BECEGATO *et al.*, 2009; SÉGER *et al.*, 2009; SUDHA *et al.*, 2009; HADZICK *et al.*, 2011; USTRA *et al.*, 2012) utilizam a tomografia elétrica em diferentes estudos, por se tratar de um método rápido, não invasivo e com respostas confiáveis.

Trabalho desenvolvido na Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba (PR), Brasil.

<sup>1</sup>Doutor em Geologia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professor Associado do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Lages (SC), Brasil.

<sup>2</sup>Doutor em Geologia pela Universidade de São Paulo. Professor Associado do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba (PR), Brasil.

<sup>3</sup>Mestre em Geologia pela Universidade Federal do Paraná. Geólogo no Laboratório de Geofísica Aplicada (LPGA) da UFPR – Curitiba (PR), Brasil.

<sup>4</sup>Doutorando em Geologia pela Universidade Federal do Paraná. Geólogo no Laboratório de Geofísica Aplicada (LPGA) da UFPR – Curitiba (PR), Brasil.

<sup>5</sup>Mestre em Geologia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Engenheiro cartógrafo pelo Laboratório de Geofísica Aplicada (LPGA) da UFPR – Curitiba (PR), Brasil.

<sup>6</sup>Mestrando em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Lages (SC), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Valter Antonio Becegato – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Avenida Luis de Camões, 2090 – 88.520.000 – Lages (SC), Brasil – valter.becegato@udesc.br

**Recebido:** 21/03/13 – **Aceito:** 25/07/16 – **Reg. ABES:** 99442

Passivos ambientais – como os lixões, os cemitérios horizontais e a contaminação por hidrocarbonetos em solos e lençol freático – podem ser estudados e monitorados com a utilização de métodos geofísicos, entre os quais a tomografia elétrica (ATEKWANA *et al.*, 2000; BERNSTONE *et al.*, 2000; DE LA VEGA *et al.*, 2003; BRAGA & CARDINALI, 2005; MENEZES *et al.*, 2011; BERTOLLA *et al.*, 2014).

A resistividade elétrica, largamente utilizada em estudos do meio ambiente, é considerada uma poderosa ferramenta para diagnosticar estudos de subsolo, geológicos e geotécnicos, conforme pode ser constatado em alguns trabalhos como os de Sauck (2000), Martinho *et al.* (2006), Lago *et al.* (2009), Rosales *et al.* (2012) e Bortolozzo *et al.* (2014).

O presente trabalho mostra os resultados de ensaios geofísicos realizados em uma área de passivo ambiental, cujo objetivo foi localizar em subsuperfície, rejeitos de produtos derivados de hidrocarbonetos, os quais estavam contaminando um lago situado nas proximidades de uma distribuidora de petróleo. Produziram-se 13 linhas de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo com  $AB=MN=4$  m, totalizando 1.024 m de perfis. Para a aquisição dos dados gravimétricos, obtiveram-se dados de 273 estações separadas de 4 em 4 m.

## Localização e descrição da área

A área localiza-se (Figura 1) no município de Renascença, Estado do Paraná, Terceiro Planalto Paranaense, cuja constituição geológica é representada pelas rochas do tipo basalto toleítico com intercalações de arenito e rochas vulcânicas ácidas, ambas cortadas por diques e sills de diabásio da formação Serra Geral do Grupo São Bento. Os solos predominantes são do grupo dos Latossolos.

Ao lado da área objeto deste trabalho, existe uma distribuidora de derivados de petróleo, cujo proprietário também é o dono da área da presente pesquisa. Como foi detectada a presença de hidrocarbonetos junto à margem de um espelho d'água, a distribuidora foi fiscalizada pelo Instituto Ambiental do Paraná, por entender que poderia haver vazamentos nos

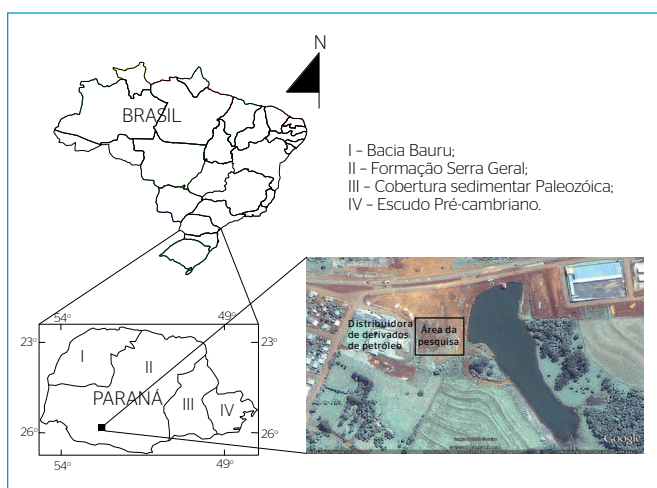


Figura 1 - Localização da área da pesquisa.

tanques de armazenamento de combustíveis. Porém, depois das pesquisas na área dos tanques de armazenamento, não foi constatado nada irregular.

Após estudos sobre a ocupação da área, que ocorreu anteriormente à instalação da distribuidora, constatou-se que o local foi utilizado nos anos 1970 como um depósito de descarte de produtos derivados de petróleo por empreiteiras que construíram a BR-280. Tal espaço era um pátio de máquinas, onde eram realizadas troca de óleo das máquinas, lavagem, jateamento, entre outros procedimentos. Nesse contexto, utilizaram-se métodos geofísicos para encontrar a célula onde o sítio contaminado estaria localizado.

## METODOLOGIA

Efetou-se a demarcação da área para instalação das linhas e dos pontos por GPS, a fim de se obter os dados georreferenciados. Foram localizadas 13 linhas para ambos os métodos. Tais ensaios envolveram a aplicação dos métodos gravimétrico, com 273 estações separadas de 4 em 4 m, e resistivimétrico estabelecendo-se 13 linhas de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo com  $AB=MN=4$  m, totalizando 1.024 m de perfis.

### Arranjo dipolo-dipolo (imageamento elétrico 2-D)

A eletroresistividade foi definida a partir do conceito fundamental da Lei de Ohm, a qual estabelece uma relação empírica entre a corrente elétrica fluindo através de um condutor e o potencial de voltagem requerido para conduzir essa corrente. Essa lei conclui que a corrente ( $I$ ) é proporcional à voltagem ( $V$ ) e é dada pela seguinte expressão:  $V=R.I$ , onde  $R$  é a resistência elétrica dos materiais e sua unidade é ohm ( $\Omega$ ).

Quando o objetivo em estudos ambientais é saber como se comporta a corrente elétrica nos diferentes meios, injeta-se uma corrente contínua  $I$  no terreno utilizando dois eletrodos ( $A$  e  $B$ ), e a diferença de potencial  $DV$  é medida por meio de outros dois eletrodos ( $M$  e  $N$ ). A função resistividade aparente ( $r_a$ ) é dada pela seguinte expressão:  $r_a = K \cdot DV/I$ . O fator  $K$  que multiplica  $DV/I$  é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos  $A$ ,  $B$ ,  $M$  e  $N$ . A resistividade aparente ( $r_a$ ) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semiespaço, para a qual contribuem os valores da resistividade em cada ponto, a geometria elétrica do terreno e a disposição geométrica dos eletrodos. Conhecendo-se a corrente que percorre o subsolo, a disposição dos eletrodos e a diferença de potencial, pode-se calcular o valor da resistividade aparente em cada posição do arranjo (Figura 2).

### Gravimetria

As principais correções aplicadas aos dados do levantamento de campo para os dados gravimétricos foram: maré e deriva instrumental. A primeira foi processada no programa interno do equipamento para cada

ponto, e a segunda calculada com o auxílio de uma planilha eletrônica. Além disso, os valores finais de gravidade, para cada estação, foram corrigidos quanto aos efeitos citados. A partir desses valores, foram realizadas as demais correções (Equação 1), que consistem na redução dos valores de gravidade à superfície do geóide, a saber:

Correção de Latitude:  $GI=978032,67714 \cdot \{ [1+0,00193185138639 \cdot (\text{sen}^2j)] / [(1-0,00669437999013 \cdot (\text{sen}^2j)]^{1/2} \}$ , onde GI é a gravidade teórica em mGal (correção de latitude) e j é a latitude;

Correção Ar Livre:  $C_{AL}=[0,308767763-0,000439834 \cdot (\text{sen}2j)-0,000000072124602 \cdot h] \cdot h$ , em mGal, onde h é a altitude e j é a latitude;

Correção Bouguer:  $C_B=0,04198088 \cdot rh-B$ , em mGal, onde r (2,67 g/cm<sup>3</sup>) é a densidade crustal média, h é a altitude e B é a correção de curvatura. Esta última correção equivale à conversão da correção Bouguer, de um platô infinito para uma calota esférica, cuja espessura é a elevação da estação com raio de 166,735 km a partir da mencionada estação;

Correção de Terreno: a correção de terreno ( $C_T$ ) foi realizada a partir da aplicação automática simultânea da carta de Hammer aos pontos da malha gravimétrica.

De posse dos dados gravimétricos corrigidos, foram geradas as anomalias Bouguer ( $D_{gB}$ ), subtraindo-se do valor da gravidade observado ( $g_{obs}$ ), já corrigido quanto aos efeitos de maré, à deriva instrumental e latitude, e ao valor da gravidade normal ( $g_n$ ), reduzido para o nível do terreno (calculado para a latitude de referência empregada na correção homônima), conforme a Equação 1:

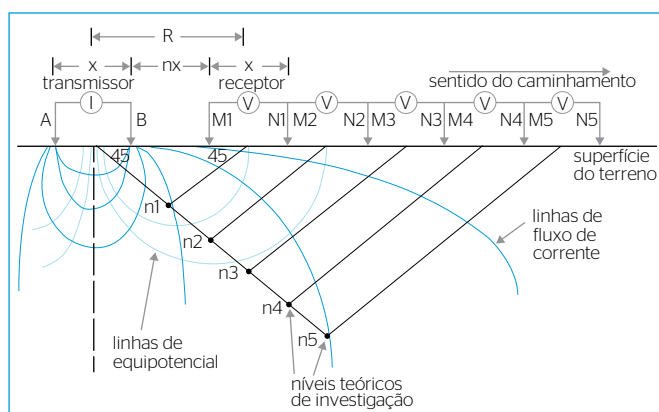
$$D_{gB} = g_{obs} - g_n + C_{AL} - C_B + C_T \quad (1)$$

Onde:

Anomalias Bouguer ( $D_{gB}$ );

Gravidade observado ( $g_{obs}$ );

Gravidade normal ( $g_n$ );



**Figura 2** - Procedimento do caminhamento elétrico através do arranjo dipolo-dipolo, indicando os eletrodos de corrente (transmissor AB), de potencial (receptor MN), linhas de equipotencial, de corrente e níveis teóricos de investigação.

Correção Ar Livre ( $C_{AL}$ );

Correção Bouguer ( $C_B$ ) e

Correção de Terreno ( $C_T$ )

As anomalias Bouguer, assim determinadas, são causadas pela presença e distribuição de massa entre a superfície física e a superfície de referência (geóide), o que permite, em um próximo passo, avaliar as dimensões (geometria, profundidade e densidade) dos corpos causadores das mencionadas anomalias. Em outras palavras, as anomalias Bouguer refletem os contrastes de densidade das rochas em subsuperfície.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Gravimetria

As Figuras 3A e 3B mostram os mapas das anomalias gravimétricas de Bouguer e Residuais. Observa-se que a porção oriental é caracterizada por sinais com maiores amplitudes, em contraposição ao segmento ocidental, onde as mesmas são intermediárias a baixas, destacando-se valores mínimos entre as estações 0-44 m das linhas L4, L5 e L6. A Figura 3B evidencia uma tendência central de resíduos negativos, disposto na direção aproximada N-S, caracterizando um trato de interesse, pois o mesmo revela contraste negativo de densidade dos prováveis alvos em relação ao meio envolvente.

### Resistividade elétrica

Os resultados são apresentados em escala de cores e valores, evidenciando dessa forma os modelos de inversão (FACHIN *et al.*, 2006; CORRÊA ALEGRIA *et al.*, 2009) que representam variação do parâmetro resistividade elétrica, cujo comportamento da corrente elétrica está relacionado com o meio por onde passa (WILSON *et al.*, 2006; GEORGAKI *et al.*, 2008).

As Figuras 4A a 4M exibem as pseudo-seções de resistividade real e os modelos de profundidade, representativos da distribuição lateral e vertical das resistividades verdadeiras, respectivamente das linhas L1 a L13. Como pode-se observar nas ilustrações, em função do espaçamento de 4 m entre os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN), a profundidade máxima modelada é de 16 m, sendo que os valores mais seguros situam-se da superfície até cerca de 8 m, considerando-se que os demais 8 m são inferidos pelo processo de inversão utilizado para gerar os citados modelos de profundidade.

Outro aspecto que sobressai nas referidas figuras é o contraste de resistividade, sobretudo nos níveis inferiores a 5 m de profundidade, entre as porções sudeste das linhas L1 a L13, caracterizadas por valores menores que 300 ohm.m, mais próximas do lago, e os tratos posicionados a noroeste, cujas magnitudes são maiores que 400 ohm.m. Tal contraste reflete o nível freático, mais condutivo, o qual é mais raso

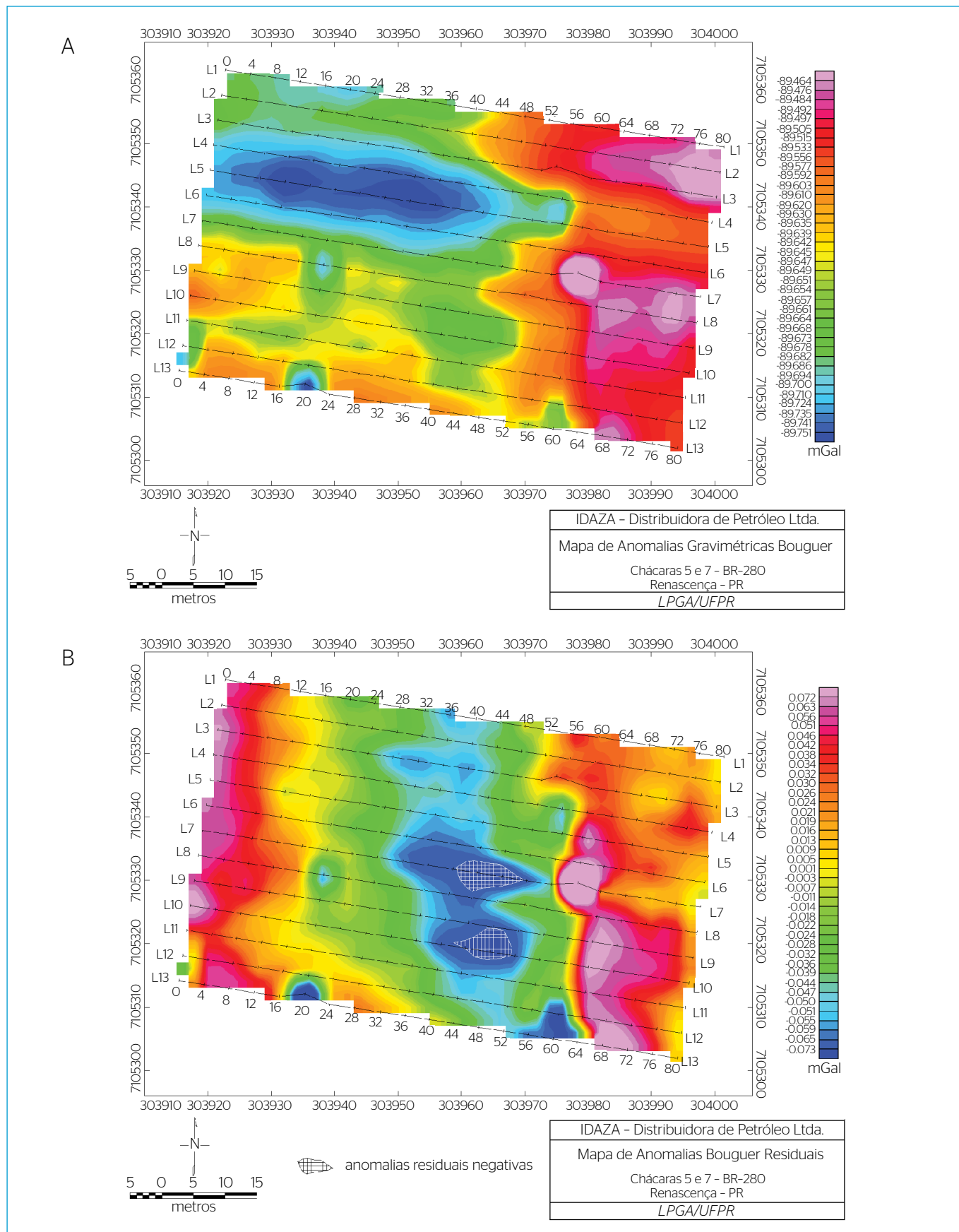


Figura 3 - (A) Distribuição espacial das anomalias gravimétricas. (B) Distribuição espacial das anomalias de Bourguer Residuais.

nos tratos sudeste, em contraposição àqueles posicionados a noroeste, onde o nível da água é mais profundo, comportamento esse que guarda relação direta com a topografia da área estudada.

Entretanto, considerando o objetivo primordial da pesquisa, atenção especial deve ser dada às respostas dos níveis mais superficiais, a fim de verificar eventuais comportamentos anômalos da resistividade, os quais podem refletir, além da fonte, a dispersão/migração de hidrocarbonetos em subsuperfície, reveladas por elevados valores (aspecto quantitativo) e formas conspícuas (aspecto qualitativo); não obstante, como se verifica nas Figuras 4A a 4M, o padrão de distribuição lateral e vertical daquela propriedade física é muito semelhante.

O exame detalhado das figuras retromencionadas, no contexto da perspectiva anteriormente descrita, apontou anomalias (ORLANDO & MARCHESI, 2001; PORSANI *et al.*, 2004) como aquelas características nas linhas L8, L9 e L10, conforme indicado nas Figuras 4H, 4I e 4J. Trabalhos como os de Braga *et al.* (2005), Moreira *et al.* (2006) e Lago *et al.* (2009), desenvolvidos em áreas contaminadas por hidrocarbonetos, também encontraram valores altos de resistividade em função do meio resistivo/conduutivo. É interessante notar que uma característica comum a tais anomalias, além dos elevados índices da resistividade verdadeira e de suas formas singulares, é a presença de pequenas perturbações condutivas rasas (máximo de 1 m), as quais devem refletir coberturas argilosas e saturadas não contaminadas.

Na Figura 4H, além da forma conspícua, a resistividade verdadeira da linha L8 é superior a 620 ohm.m, entre as estações 48 e 68 m, atingindo uma profundidade máxima de 4 m abaixo da superfície do terreno, em torno da estação 56 m. Na Figura 4I, apesar dos valores de resistividade da linha L9 não serem anômalos (superiores a 578 ohm.m), sua forma chama a atenção entre as estações 48 e 64 m, com profundidade máxima de 2 m. Na Figura 4J, entre as estações 20 e 40 m da linha L10, assinala-se a mais expressiva anomalia de resistividade real,

considerando sua forma ímpar, valores de resistividade real superiores a 1.000 ohm.m e profundidade máxima de cerca de 7 m, centrada na estação 30 m.

A fim de avaliar quantitativamente, com mais precisão, os valores de resistividade real dos modelos de profundidade, foi construída a Tabela 1, que mostra os valores mínimos, máximos, as médias e os desvios padrão de cada linha levantada. É perceptível que na linha L10 se assinala o maior índice encontrado (46.655 ohm.m), assim como a média mais elevada (1.009 ohm.m), seguido da linha L8 (máximo de 12.763 ohm.m, com média de 505 ohm.m). De fato, os valores de resistividade real da linha L9, como já referido, não são significativos (máximo de 1.372 ohm.m), com média de 386 ohm.m, tendo sido selecionada para verificação direta tão-somente pela sua forma. Na referida tabela, também são exibidas, para efeito de comparação, as médias dos valores mínimos (35 ohm.m), máximos (2.276 ohm.m), das médias (432 ohm.m) e dos desvios padrão (344 ohm.m) de todas as linhas levantadas e invertidas (L1 a L13), com exclusão daqueles correspondentes às linhas L8 e L10.

Na Figura 5, evidenciam-se os locais anômalos derivados da interpretação dos resultados gravimétricos e resistivimétricos, sendo esta última sobre o modelo digital de elevação (MDE), as quais indicam os pontos, por ordem de prioridade, que devem ser objeto de verificações diretas.

Após as interpretações dos dados da resistividade elétrica e gravimétricos, elencaram-se quatro áreas para as prospecções.

Com relação ao ponto 1 (Figura 5), esse representa a anomalia de resistividade centrada na estação 30 m. A escavação nesse local revelou fragmentos de uma laje de concreto armado, responsável pela referida anomalia com altos valores de resistividade, conforme a Tabela 1.

No que se refere aos pontos 2, 3, 4 e 5 da Figura 5, ressalta-se que os pontos 2 e 3 estão relacionados com anomalias de

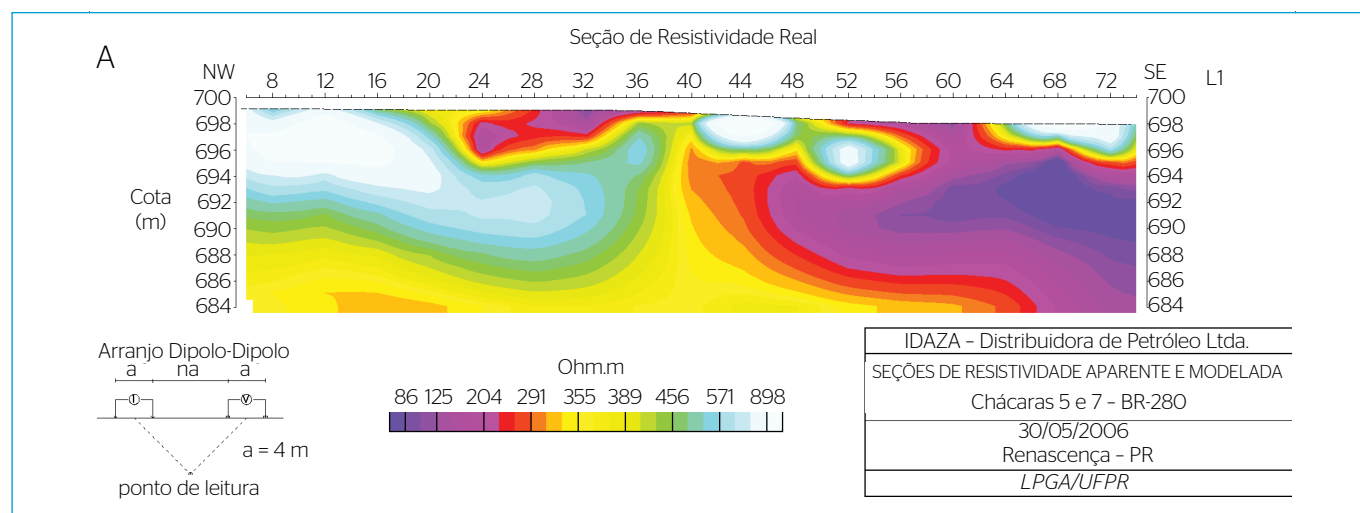


Figura 4 - Seções das resistividades reais das 13 linhas pesquisadas.

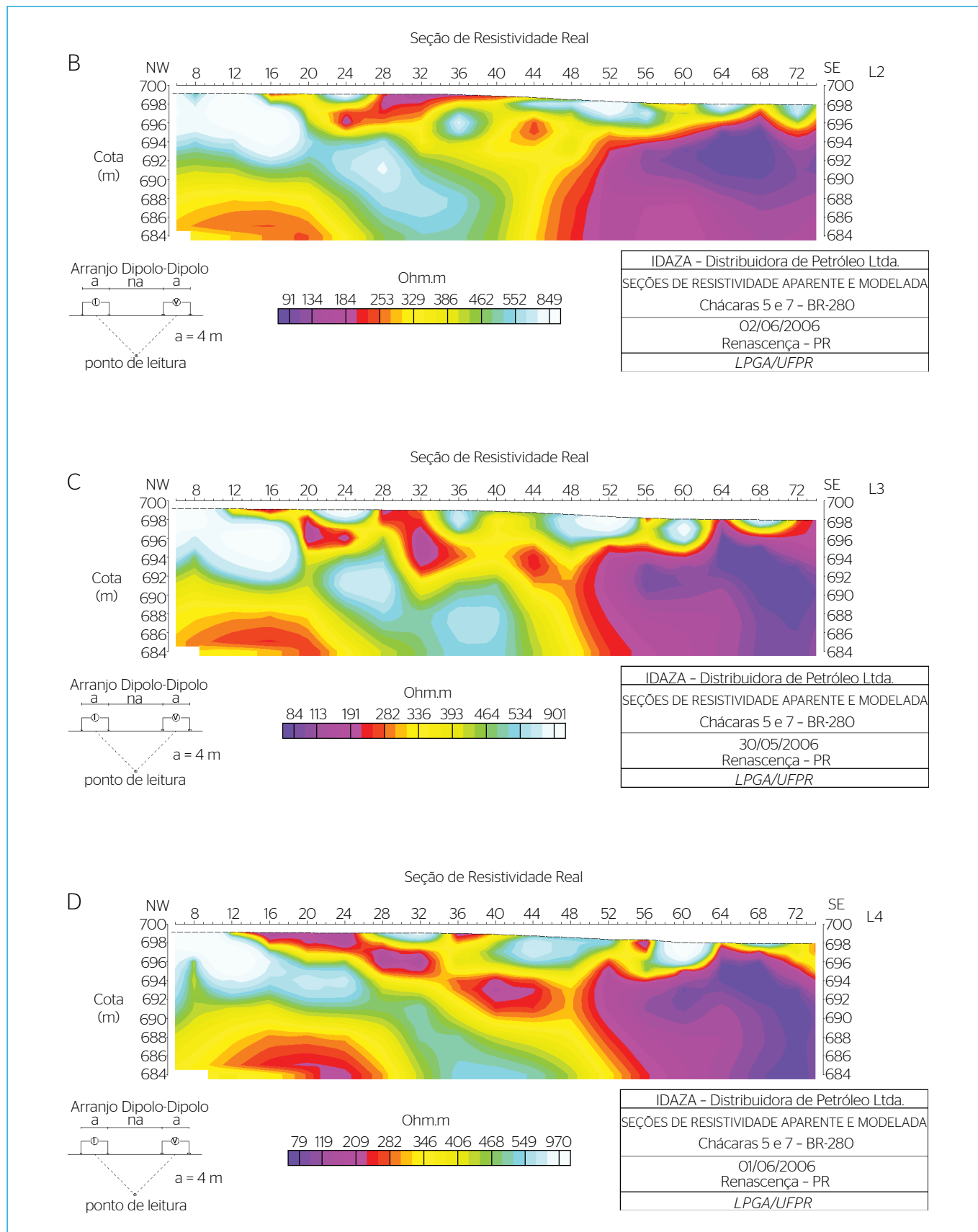


Figura 4 - Continuação.

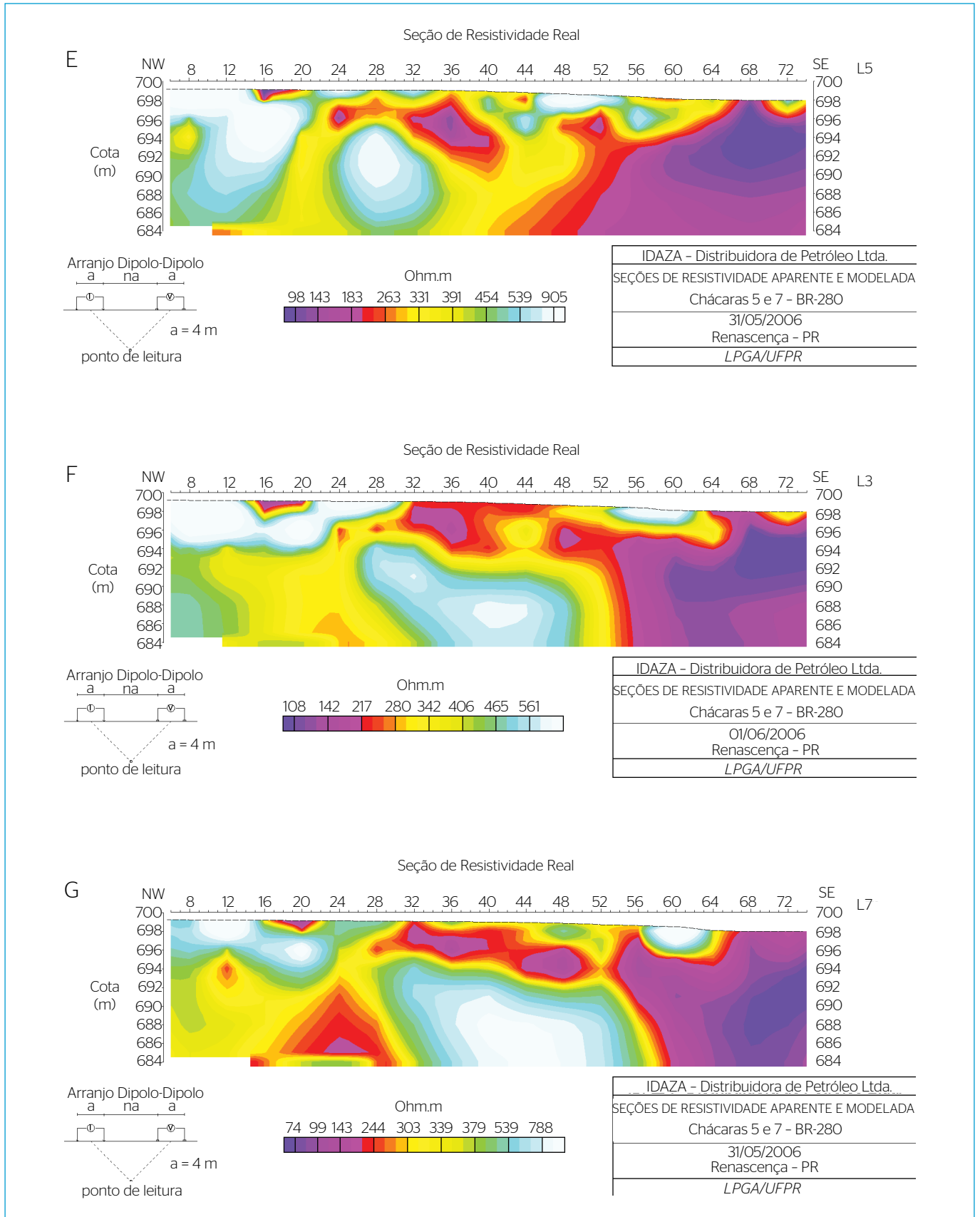


Figura 4 - Continuação.

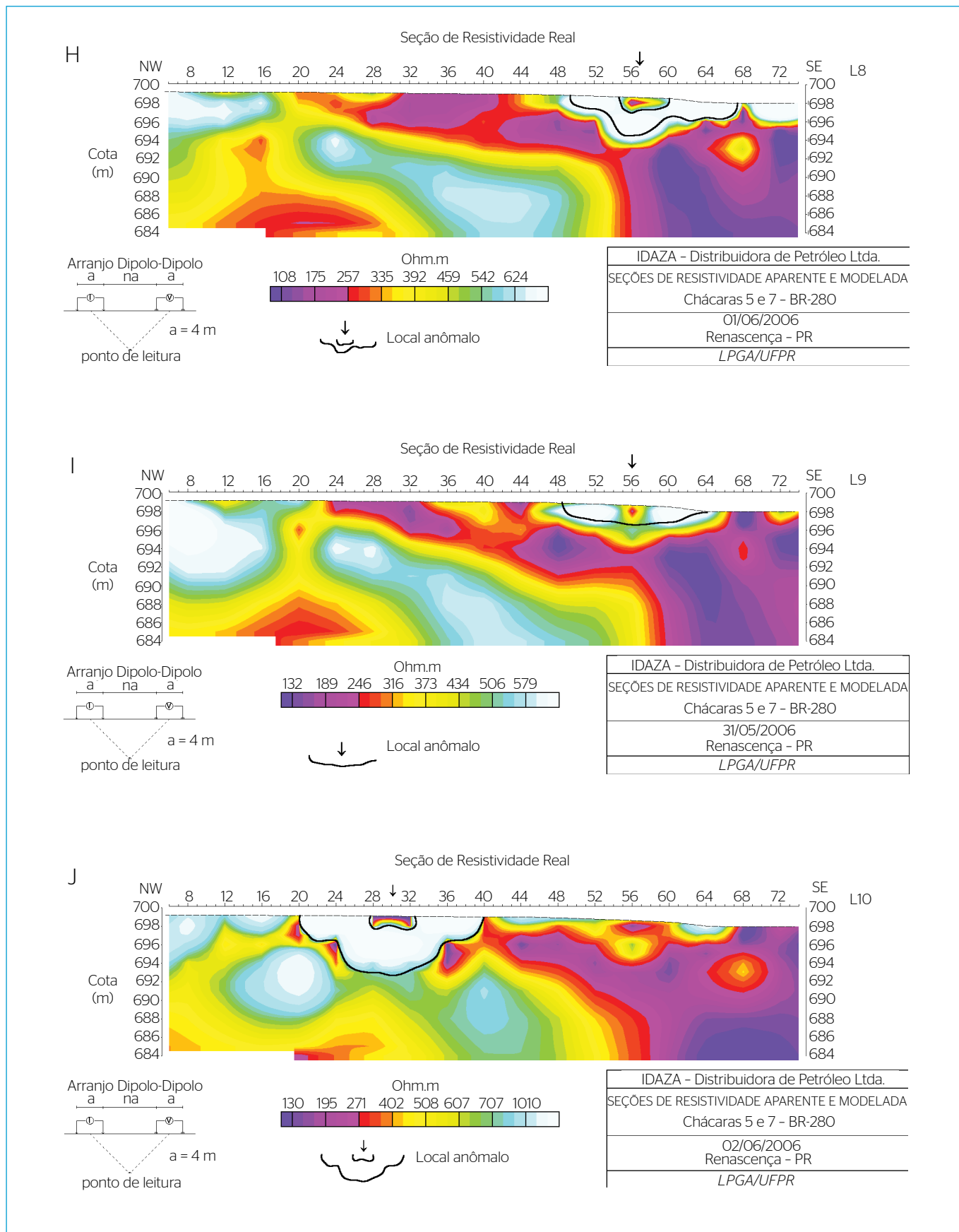


Figura 4 - Continuação.



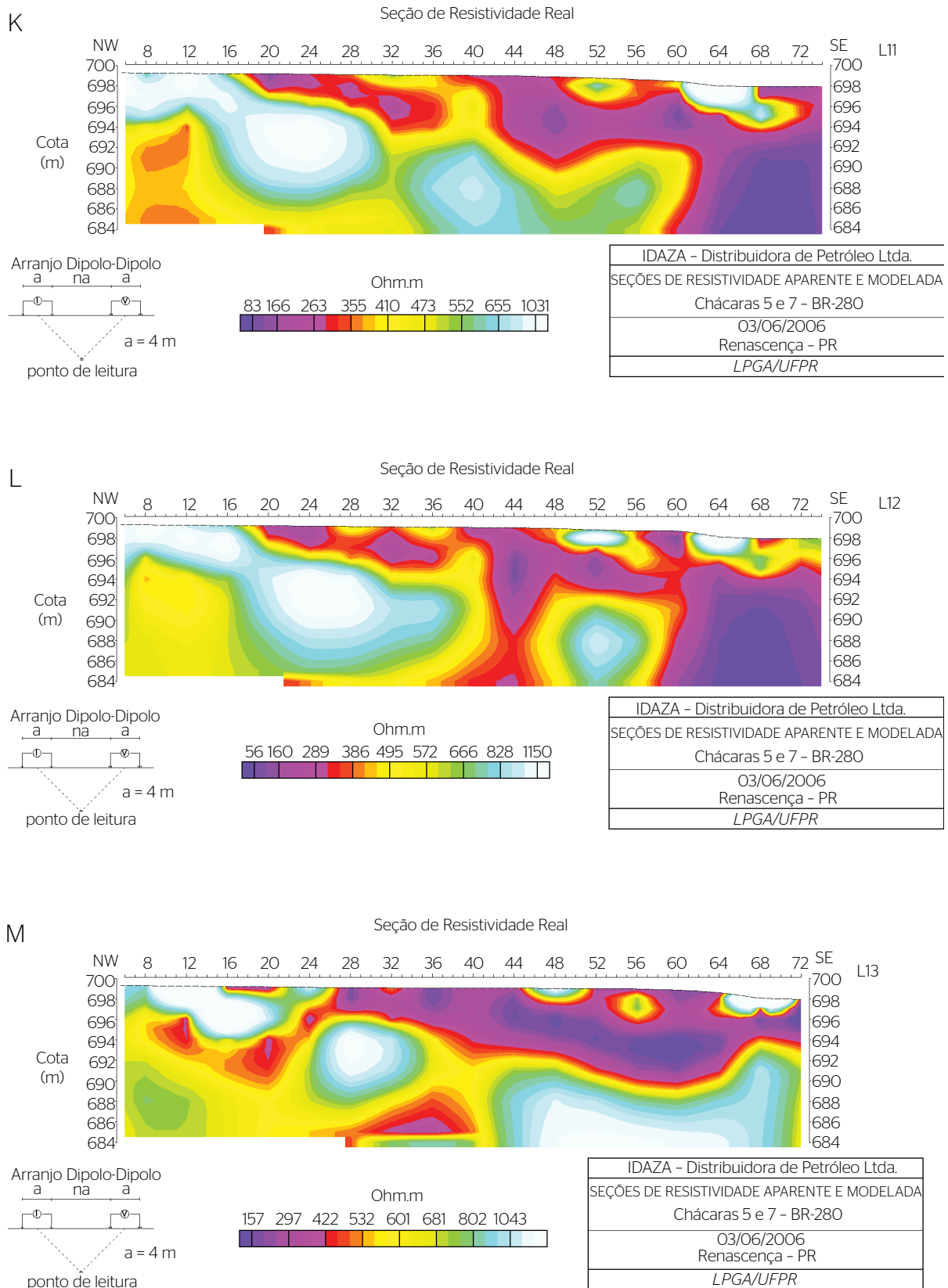


Figura 4 - Continuação.

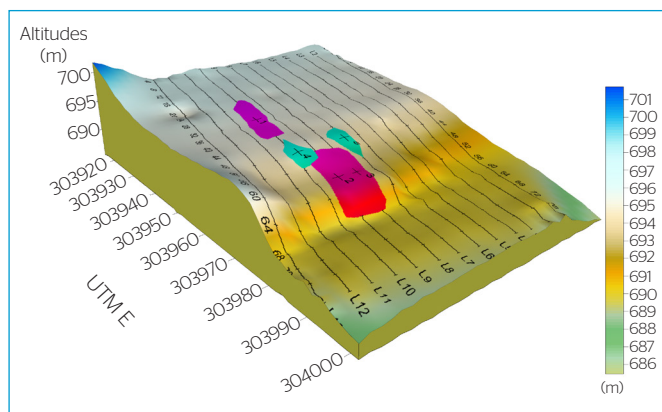
resistividade das linhas L8 e L9, enquanto os pontos 4 e 5 representam anomalias gravimétricas residuais negativas. A verificação direta dos referidos pontos resultou em fragmentos de rocha basáltica não alterada, envolvidos por solos, explicando os altos valores de resistividade dos pontos 2 e 3 indicados na Tabela 1, enquanto as anomalias gravimétricas dos pontos 4 e 5 poderiam ser explicadas pelo contraste negativo de densidade entre os solos e os fragmentos rochosos.

A interface resistiva/condutiva, observada nas linhas L8 e L9, estações 64 e 68 m, assim como um núcleo medianamente resistivo envolvido por uma zona condutiva centrada na estação 68 m motivaram a verificação direta dessas anomalias. Após escavados 2 m de profundidade (Figura 6), sentiu-se um forte odor de hidrocarboneto que

**Tabela 1** - Estatísticas descritivas dos valores de resistividade real (ohm.m) das linhas L1 a L13.

N = 147	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Linha L1	35	1.976	403	295
Linha L2	51	1.574	390	275
Linha L3	44	1.455	392	285
Linha L4	25	2.302	435	395
Linha L5	37	2.307	396	344
Linha L6	58	1.310	356	251
Linha L7	51	1.812	360	294
<b>Linha L8</b>	<b>16</b>	<b>12.763</b>	<b>505</b>	<b>1.107</b>
Linha L9	31	1.372	386	245
<b>Linha L10</b>	<b>11</b>	<b>46.655</b>	<b>1.009</b>	<b>4.064</b>
Linha L11	34	3.288	467	389
Linha L12	20	2.842	549	423
Linha L13	03	4.797	616	590
<b>Média*</b>	<b>35</b>	<b>2.276</b>	<b>432</b>	<b>344</b>

\*Médias de resistividade real (ohm.m), calculadas com exclusão dos valores das linhas L8 e L10.



**Figura 5** - Mapa integrado de interpretação geofísica sobre o Modelo Digital de Elevação.

impregnava todo o perfil do solo até atingir a profundidade de 3 m no nível do lençol freático, evidenciando assim a contaminação da área.

Foram realizadas amostragens de solos e água que, após análises por cromatografia gasosa, revelaram concentrações médias de 536 mg.L<sup>-1</sup> em solos e 618 mg/l em água de hidrocarbonetos poli-aromáticos (HPAs). Tomando-se por base a resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece “Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes”, o limite de óleos minerais é de até 20 mg.L<sup>-1</sup>. As amostras ultrapassaram em mais de 26 a 30 vezes, respectivamente, o limite máximo permitido.

## CONCLUSÃO

A utilização do método geofísico da resistividade elétrica foi fundamental para a descoberta da célula contaminada com hidrocarboneto.

Detectou-se a presença de hidrocarboneto a 3 m de profundidade nas linhas L8 e L9, especificamente nas estações 64 e 68.

As altas concentrações de HPAs evidenciam forte contaminação do passivo ambiental, objeto da presente pesquisa.

A remediação da área deverá ser feita com a remoção dos solos contaminados para tratamento *in situ* ou *ex situ*. Caso não sejam tratados, os solos retirados deverão ser depositados em aterro industrial.



**Figura 6** - Escavação com surgimento do lençol freático e pluma de contaminação.

## REFERÊNCIAS

- Amato, M.; Bitella, G.; Rossi, R.; Gómez, J.A.; Lovelli, S.; Gomes, J.J.F. (2009) Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *European Journal of Agronomy*, v. 31, n. 4, p. 213-222.
- Atekwana, E.A.; Sauck, W.A.; Werkema Jr., D.D. (2000) Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, v. 44, n. 2-3, p. 167-180.
- BECEGATO, V.A.; FERREIRA, F.J.F. (2005) Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 371-405.
- BECEGATO, V.A.; STEVANATO, R.; FERREIRA, F.J.F.; CUNHA, J.U.; CABRAL, J.B.P. (2009) Investigações geofísicas aplicadas no lixão desativado do município de Saudades do Iguazú-PR. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 3, n. 1, p. 47-55.
- BERNSTONE, C.; DAHLIN, T.; OHLSSON, T.; HOGLAND, W. (2000) DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology*, v. 39, n. 3-4, p. 360-371.
- BERTOLLA, L.; PORSANI, J.L.; SOLDOVIERI, F.; CATAPANO, I. (2014) GPR-4D monitoring a controlled LNAPL spill in a masonry tank at USP, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 103, p. 237-244.
- BORTOLOZO, C.A.; COUTO JR., M.A.; PORSANI, J.L.; ALMEIDA, E.R.; MONTEIRO SANTOS, F.A. (2014) Geoelectrical characterization using joint inversion of VES/TEM data: A case study in Paraná Sedimentary Basin, São Paulo State, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 111, p. 33-46.
- BRAGA, A.C.; CARDINALI, M.T. (2005) Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 2, p. 181-190.
- CORRÊA ALEGRIA, F.; MARTINHO, E.; ALMEIDA, F. (2009) Measuring soil contamination with the time domain induced polarization method using LabVIEW. *Measurement*, v. 42, n. 7, p. 1082-1091.
- de la Vega, M.; Osella, A.; Lascano, E. (2003) Joint inversion of Wenner and dipole - dipole data to study a gasoline-contaminated soil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 54, n. 1-2, p. 97-109.
- FACHIN, S.J.S.; HUBER, F.; SHIRAIWA, S.; BORGES W.R.; MIGLIORINI, R.B. (2006) Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 1, p. 129-138.
- Friedel, S.; Thielen, A.; Springman, S.M. (2006) Investigation of a slope endangered by rainfall-induced landslides using 3D resistivity tomography and geotechnical testing. *Journal of Applied Geophysics*, v. 60, n. 2, p. 100-114.
- GEORGAKI, I.; SOUPIO, P.; SAKKAS, N.; VERVERIDIS, F.; TRANTAS, E.; VALLIANATOS, F.; MANIOS, T. (2008) Evaluating the use of electrical resistivity imaging technique for improving CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission rate estimations in landfills. *Science of the Total Environment*, v. 389, n. 2-3, p. 522-531.
- HADZICK, Z.Z.; GUBER, A.K.; PACHEPSKY, Y.A.; HILL, R.L. (2011) Pedotransfer functions in soil electrical resistivity estimation. *Geoderma*, v. 164, n. 3-4, p. 195-202.
- LAGO, A.L.; Elis, V.R.; Borges, W.R.; Penner, G.C. (2009) Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. *Environmental Geology*, v. 58, n. 2, p. 407-417.
- Martinho, E.; Almeida, F.; Senos Matias, M.J. (2006) An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements. *Journal of Applied Geophysics*, v. 60, p. 27-40.
- MENEZES, A.M.; MOREIRA, C.A.; ILHA, L.M.; SCHWEIG, C. (2011) Estudo geofísico de vazamento de combustíveis em posto de abastecimento. *Geociências*, v. 30, n. 4, p. 601-609.
- MOREIRA, C.A.; DOURADO, J.C.; BRAGA, A.C.O. (2006) Aplicação de técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 3, p. 383-392.
- Orlando, L.; Marchesi, E. (2001) Georadar as a tool to identify and characterise solid waste dump deposits. *Journal of Applied Geophysics*, v. 48, n. 3, p. 163-174.
- PORSANI, J.L.; FILHO, W.M.; ELIS, V.R.; SHIMELES, F.; DOURADO, J.C.; MOURA, H.P. (2004) The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 55, n. 3-4, p. 199-209.
- ROSALES, R.M.; Martínez-Pagan, P.; Faz, A.; moreno-Cornejo, J. (2012) Environmental Monitoring Using Resistivity Electrical (ERT) in Subsoil of Three Former Petrol Stations in SE of Spain. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 223, n. 7, p. 3757-3773.
- Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Bruand, A.; Richard, G. (2005) Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*, v. 83, n. 2, p. 173-193.
- SAUCK, W.A. (2000) A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, v. 44, n. 2-3, p. 151-165.
- Séger, M.; Cousin, I.; Frison, A.; Boizard, H.; Richard, G. (2009) Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil & Tillage Research*, v. 103, n. 2, p. 387-398.

Sudha, K.; Israil, M.; Mittal, S.; Rai, J. (2009) Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, v. 67, n. 1, p. 74-79.

Ustra, A.T.; Elis, V.R.; Mondelli, G.; Zuquette, L.V.; Giacheti, H.L. (2012) Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 66, n. 3, p. 763-772.

WILSON, S.R.; INGHAM, M.; McCONCHIE, J.A. (2006) The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. *Journal of Hidrology*, v. 316, n. 1-4, p. 301- 312.

YOON, G.L.; PARK, J.B. (2001) Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils. *Journal of Hazardous Materials*, v. 84, n. 2-3, p. 147-161.